

完全円偏光の生成とこれを用いた
分光エリプソメーターの精密校正法の開発

(研究課題番号 09650041)

平成9年度～平成10年度科学研究費補助金（基盤研究(C)⁽²⁾）研究成果報告書

平成11年3月

研究代表者 山本正樹
(東北大学科学計測研究所)

はしがき

分光エリプソメーター（以下S Eと省略）は、紫外から可視・赤外の波長域にわたって、完全直線偏光を試料に入射したとき、反射光が試料の光学的性質に応じて楕円偏光となる現象を精密計測に利用する方法である。極薄膜にも0.01nmの膜厚感度があることから、半導体素子生産のプロセスの精密制御用の高精度モニターとして注目されている。このため、世界的に自動測定のS Eが開発・発売され、国内でもここ数年で百台近い規模で半導体素子メーカーを中心に納入されている。

このような急激な普及にともなって、S Eの精度の校正の問題が浮上してきた。本研究代表者は、計測法の立場からこの問題に以前から興味をもっており、国際的なラウンドロビン測定に参加して各メンバーの測定値の誤差要因の検討を行った。メンバーの素データを取り寄せて比較をした結果、2名については、基板の裏面の反射の除去が不完全であるための系統誤差を含んでいる可能性が高かった。このデータを除外すると、標準偏差は0.6%程度になる。しかし、さらに一桁の不一致がのこる。この不一致は、従来から経験的に知られている値と同程度で、装置の校正の不備に起因する。すなわちS Eが偏光楕円を正しく計測していないことを示している。この問題を解決するには、現在要求されている0.1%よりも良い精度で装置を精密に校正する方法を確立することが不可欠である。

本研究では、このような背景をもとに、S Eの精密校正法の要として、まず、位相子を使わずに、楕円率角 $90.000^\circ \pm 0.005^\circ$ の完全円偏光を分光波長域全体で実現する。この完全円偏光を基準偏光として、従来の完全直線偏光だけを用いる校正法の不備をおぎない、測定の精密度に見合う0.02%の精密度でS Eを校正する方法を確立する。また、この過程で、系統誤差の程度と性質を定量的に明らかにして、オーバーオールに測定の正確度を0.1%にすることを目的として平成9年度および10年度の二年間にわたって研究をおこなった。その成果は以下のようにまとめられる。

エリプソメーターの測定誤差は、本研究の結果、装置固有の各種の系統誤差に加えて、試料の裏面処理と解析計算モデルの妥当性に付随する系統誤差に大別できた。まず、装置固有の系統誤差では、誤差原因を分離して検知し、処理する方法を考案した。理想的に校正された回転検光子装置では、完全円偏光に対しては出力が直流成分のみになる。残留周波数成分が回転数に一致する場合は、プリズム検光子の微小偏角によるビームの振れ、あるいは、検出器の感度ムラと回転機構に付随する機械的変動や光路中のビームの蹴られなどが結合した原因である。一方、回転周波数の2倍の成分の場合は、検出器の偏光特性などの偏光特性が関与した誤差と判断できる。また、装置に固有で調整できない誤差として、位相子の吸収二色性と位相角の $\pm 90^\circ$ からのずれを、位相子を装置に搭載したままで計測する方法を開発した。計測された値を考慮すると、SEで一般的な $\lambda/4$ 板の方位角を $+45^\circ$ または 45° に固定した単一ゾーン測定 of 誤差を $1/20$ に減少できた。

さらに、試料の裏面反射の処理に付随する誤差と、試料薄膜の屈折率の厚さ方向の変化（不均一）の影響が明らかにできた。裏面反射については、波長の関数として周期的に起こる完全直線偏光反射の条件に着目し、残留する楕円率が誤差に比例することを利用して校正できた。また、不均一は、この条件で反射される完全直線偏光の方位角と、膜のない基板だけの試料での方位角との差で定量的に校正できる。

本報告では、本調整法の要である円偏光生成法とそれを用いた $1/4$ 波長板の誤差要因の吸収二色性と位相角の精密測定について述べ、これらを補正することによって、回転素子法のみならず、より高精度の消光法エリプソメーターの補正も行えることを示した。また、半導体応用での新しい方向として、高精度化を達成することによって可能になる、微細な回路の露光過程での露光条件の検知の研究については、研究報告の別刷りを添付した。今後本研究の成果を骨組みとしてさらに発展させ、エリプソメーターの高精度校正法のマニュアルとして完成させたい。

研究組織

研究代表者：山本正樹（東北大学科学計測研究所）

研究経費

平成9年度： 2, 100千円

平成10年度： 1, 300千円

計 3, 400千円

研究発表

（1）学会誌等

New Ellipsometric Approach to Critical Dimension Metrology Utilizing Form Birefringence Inherent in a Submicron Line-and-Space Pattern
Seiji Takeuchi, Minoru Yoshii and Masaki Yamamoto
Japan. J. Appl. Phys., 36 (1997), 7720-7725.

（2）口頭発表

A New Ellipsometric Approach to CD Metrology Utilizing Form Birefringence Inherent in a Sub-Micron L&S Pattern
Seiji Takeuchi, Minoru Yoshii and Masaki Yamamoto
10th Int. Meet. Microprocesses and Nanotechnology, 1997年7月, 名古屋

ラウンドロビン試料の高精度分光エリプソメトリー測定と誤差要因

山本正樹，古舘三七二

応用物理学会，1998年3月，東京

軟X線多層膜モニター用の高精度自動消光エリプソメーターの開発

堀田善文，梅津裕生，古舘三七二，山本正樹

応用物理学会，1999年3月，野田

研究成果

1. はじめに

回転検光子法によるエリプソメーターでは、検光子を定速回転して得られた交流信号から、楕円率は、交流信号の最大値と最小値の割合として、楕円の方角は信号の位相角として計測される。

本研究では、完全円偏光では原理的に変調成分がゼロになり直流成分のみで、系統誤差にもっとも敏感であることに着目した。また、校正のための円偏光は、位相子を用いず、偏光子と反射試料で生成できる特徴がある。実験は、代表者が開発した汎用エリプソメーターを用いて行った。以下に、装置の誤差要因をまとめたのち、円偏光の生成と $\lambda/4$ 板の自己測定について述べる。

2. エリプソメーターの誤差要因とアライメント

一般に、エリプソメーターによる測定の高い正確度は、装置の系統誤差を消光の平均化で除去して達成する。回転検光子法では、いずれか1つの zone のみで測定を行うので系統誤差の影響が、その装置固有の値となり、解析に影響を及ぼす。偏光楕円を正しく計測する装置と見た場合のエリプソメータの誤差要因は、

1. 光学素子の p 方向からのずれ。
2. 偏光子の端面が平行でないために偏光子の回転により起こる入射角の変動。
3. 偏光子と検光子の消光率に起因する方位角の測定誤差。
4. $\lambda/4$ 板に起因する誤差。

が挙げられる。

2-1 エリプソメーターのアライメント

本研究では、自作した汎用エリプソメーターを用いて実験を行った。この装置について、それぞれの誤差要因を検討し次のように除去してアライメントを

行った。まず、光軸と各光学素子の調整は、パンタグラフ方式による入射角出射角連動装置（ $\theta - 2\theta$ 連動装置）によって調整した。光軸は試料台の回転軸を基準とした。入射角の読み取り精度は試料面を微調し、 $\pm 0.0025^\circ$ 以内となるようにした。偏光子、検光子、 $\lambda/4$ 板はそれぞれ 180° 回転させたとき、回転中心と光軸のずれが 1mm 以内となるようにし、光学素子からの反射光でレーザーが発振しないように回転エンコーダーごとわずかに傾けた。この結果、偏光子の偏角による入射角の変動は 0.003° 以内、 $\lambda/4$ 板の偏角は 0.02° 以内であった。

ファラデーセルは $\phi 0.5\text{mm}$ のピンホールを用いて光軸がファラデーローターガラスの中心を通るようにし、反射光がレーザーに戻らないようにわずかに傾けた。

光学素子の p 方向の決定には、ガラスのブリュースター角を用いた。具体的な調整手続きを以下に示す。

1. $\lambda/4$ 板と検光子を光路から取り除きガラス試料と偏光子だけにする。
2. ガラスを試料台にセットし、おおむねブリュースター角とする。
3. 偏光子の方位角と入射角を交互に変え、もっとも反射強度の落ちる位置を探す。
4. 偏光子をこの位置から 90° 回し、ガラスからの出射光を完全な s 偏光とする。検光子を光路に戻し、回転させて消光位置を求めると、検光子は完全な p 方向を向いている。
5. 次に、ガラス試料を外し光路上に偏光子と検光子を置き、検光子を s 方向とし、偏光子を回転させて消光位置を求め、これを偏光子の p 方向とする。
6. 最後に、偏光子と検光子の間に $\lambda/4$ 板を配置し、偏光子を p 方向、検光子を s 方向とした直交ニコルの状態で進相軸を p 方向に向け最も消光する位置を $\lambda/4$ 板の p 方向とする。

この方法によれば、 p 方向の決定誤差は 0.005° 以下にできる。

また、すべての光学素子は高精度の回転スケールで回転させ、光学素子の端面

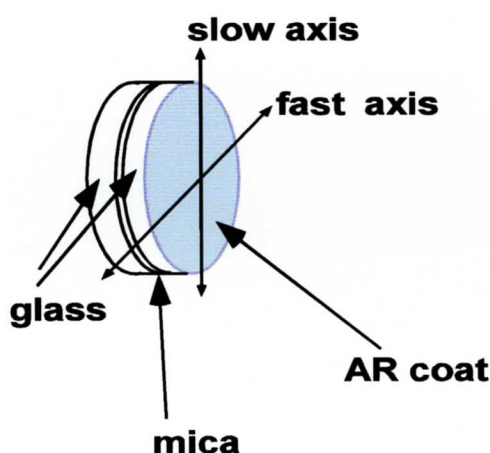
の平行度は $20''$ 以下であり、実測した偏光子の偏角による偏光子の回転に伴う試料への入射角の変化は 0.003° 以内である。

偏光子と検光子は高精度の回転エンコーダーにマウントされていて消光比 6.4×10^{-8} のハーレー社製のグランートムソンプリズムを使用し、偏光子と検光子の方位角測定誤差は 0.001° 以下である。

これらの測定値から、系統誤差を測定上の要求に対して十分小さくすることに対して、 $\lambda/4$ 板が大きな障害となる。

2-2 $\lambda/4$ 板の構造とその問題点

図 1 一般的な $\lambda/4$ 板



市販品のものは、二軸異方性がある雲母を、中性軸方向に振動面を持つ光の位相が $\pi/2$ だけずれるような厚さに劈開したものをクラウンガラスで挟み、反射防止膜(AR コート)を蒸着したものが一般的である。

$\lambda/4$ 板の主な誤差要因は

1. 進相軸 (f 軸) 成分のほうが遅相軸 (s 軸) 成分よりも若干大きく吸収される。
2. 位相差は劈開した厚さによって定まるので正確に $-\pi/2$ とはならない。

3. 光学特性は雲母のグレイン毎に若干進相軸と遅相軸がずれているため面内分布がある。

4. 光軸と $\lambda/4$ 板は、本来垂直でなければならないが取り付け誤差などによる光軸との傾きが無視できない。

ことが挙げられる。

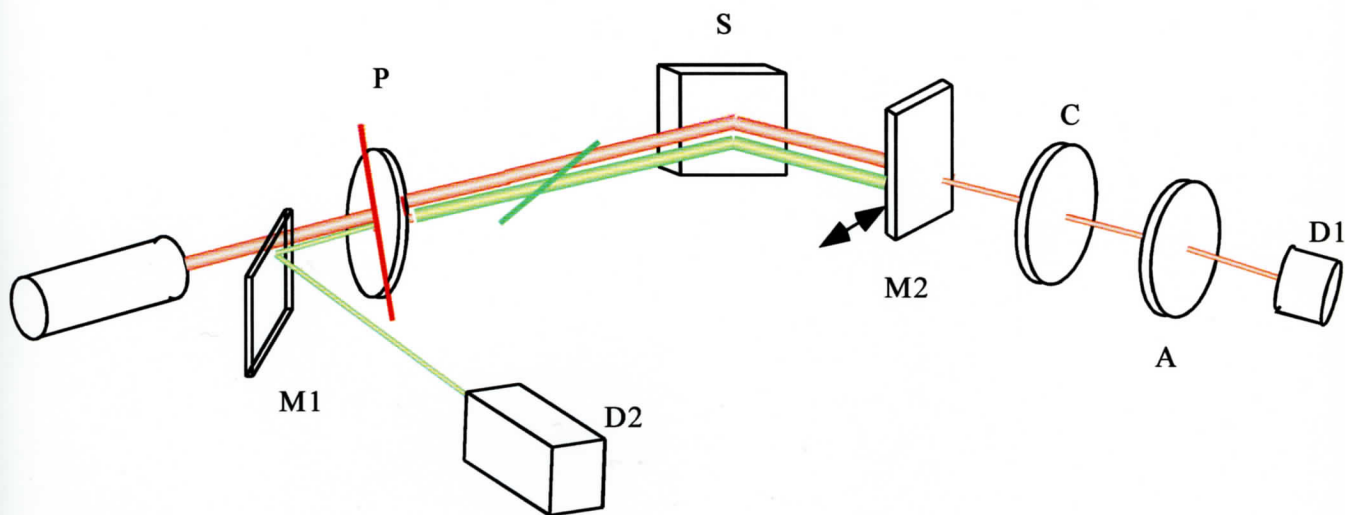
以下の $\lambda/4$ 板について、その性能と補正の有用性について調べた。

1. 雲母をガラスで挟み AR コートを施したもの。
2. 雲母のみのもの。
3. 雲母に直接 AR コートを施したもの。

2-3 $\lambda/4$ 板自己測定の方法

通常の PSCA 配置消光型エリプソメーターに簡単な機構を付加するだけで、 $\lambda/4$ 板の光学特性値 $\rho_s = \tan \psi_s \exp(i\delta_s)$ を測定する方法を以下に示す。

図 2 $\lambda/4$ 板自己測定の方法



製作した消光型エリプソメーターからファラデーセルを取り除き, $\lambda/4$ 板の光学特性値を測定した.

M1 は出し入れ可能な反射鏡, M2 はナイフエッジ様の反射鏡であり, 副検出器 D2 を入れ, 折り返し光路型にする. M2 はナイフエッジ様の反射鏡を用いたほうが, ビームスプリッターより迷光が少なく有利である.

試料には Au または Pt をイオンビームスパッタ成膜により十分厚く (200nm 程度) つけたものを用いた.

偏光子及び検光子は, 消光比 ($I_{\pi/2}/I_0$) が 6.4×10^{-8} 程度のもので使用した. 前述の通り偏光子, 検光子, $\lambda/4$ 板は個別に高精度回転エンコーダーに取り付けられており, その測定精度は $\pm 0.0025 \text{deg.}$ である

D_1, D_2 は, CCD カメラに望遠鏡を取り付けたものを用いて消光を検知した.

円偏光の生成

S の複素振幅反射率比を r_p/r_s 位相差を Δ とするとそのジョーンズベクトルは

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \exp(j\Delta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

と書ける.

反射鏡 M₁ を光路に挿入し, 副検出器 D₂ において消光をとる. 消光条件は試料から左右円偏光が出射するときで, そのとき M2 で反射された光は M2 で反射される前の光と逆回りの円偏光となる. このとき再び試料で反射され, 偏光子に入射する光は偏光子の透過軸と直交した直線偏光となる.

その条件は

$$\phi = \phi_p, \quad \Delta = \pm \frac{\pi}{2}$$

$$P = \theta_p, \quad \left| \tan \theta_p \right| = \frac{r'_p}{r'_s} \quad (2)$$

と書ける⁽⁹⁾.

ここで, ϕ_p, θ_p はそれぞれ主入射角, 主方位角である.

これより ϕ_p, θ_p において消光した状態では

$$\mathbf{S} = \mathbf{r}'_s \begin{bmatrix} \left| \tan \theta_p \right| & 0 \\ 0 & -j \end{bmatrix} \quad (3)$$

となる.これは試料からそれぞれ, θ_p が正のとき左回り円偏光, θ_p が負のとき右回り円偏光が出射することを意味する.また,金属の主入射角では $\phi_p = \pm \pi/2$ なので,試料は反射型の $\lambda/4$ 板として働く.

次に入射角を ϕ_p から変えずに \mathbf{M}_1 を光路からはずし,偏光子検光子を回転して検出器 \mathbf{D}_1 において消光をとる. $\lambda/4$ 板から射出する光の偏光状態 \mathbf{E}_c は

$$\mathbf{E}_c = \begin{bmatrix} E_{cx} \\ E_{cy} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \mathbf{R}_c \mathbf{S} \begin{bmatrix} \cos P \\ \sin P \end{bmatrix} \quad (4)$$

と書ける.

\mathbf{C}, \mathbf{R}_c は $\lambda/4$ 板のそれぞれジョーンズベクトル,座標回転ベクトルである.各行列を展開すれば

$$\begin{bmatrix} E_{cx} \\ E_{cy} \end{bmatrix} = \mathbf{r}'_s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos C & \sin C \\ -\sin C & \cos C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left| \tan \theta_p \right| & 0 \\ 0 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P \\ \sin P \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる.

$\lambda/4$ 板から射出する光の偏光状態を $\chi_c = E_{cy}/E_{cx}$ で表すと

$$\chi_c = -\rho_c \frac{\left| \tan \theta_p \right| \tan C + j \tan P}{\left| \tan \theta_p \right| - j \tan P \tan C} \quad (6)$$

であり,

$\lambda/4$ 板方位を基準とした検光子の透過軸方向と直交する方位の偏光状態を

$\chi_A = E_{Ay}/E_{Ax}$ で表すと

$$\chi_A = -\cot (A - C) \quad (7)$$

と書ける.

D_1 における消光状態では $\chi_c = \chi_A$ であるので, ρ_c は

$$\rho_c = \frac{\cot(A-C)}{\tan^2 \theta_p \tan^2 C + \tan^2 P} \left\{ \left(\tan^2 \theta_p - \tan^2 P \right) \tan C - j(\tan^2 c + 1) \left| \tan \theta_p \right| \tan P \right\} \quad (8)$$

と書ける.

一方, $\lambda/4$ 板の光学特性値 ρ_c は, T_c, δ_c をそれぞれ slow 軸, fast 軸の複素振幅透過率比及び位相差として

$$\rho_c = T_c \tan(j\delta_c) \quad (9)$$

で表されるので, T_c, δ_c は

$C = \pm \pi/4$ のときは簡単になり

$$T_c = \left| \frac{\cot(A-C)}{\tan^2 \theta_p \tan^2 C + \tan^2 P} \right| \left\{ (\tan^2 \theta_p - \tan^2 P)^2 \tan^2 C + (\tan^2 C + 1)^2 \tan^2 \theta_p \tan^2 P \right\}^{1/2} \quad (10)$$

$$\tan \delta_c = \frac{-2 \left| \tan \theta_p \right| \tan P}{\sin 2C (\tan^2 \theta_p - \tan^2 P)} \quad (11)$$

$$T_c = |\cot(A - \pi/4)|, \quad \tan \delta_c = \frac{-2 \left| \tan \theta_p \right| \tan P}{\tan^2 \theta_p - \tan^2 P} \quad \text{when } C = +\pi/4; \quad (12)$$

$$T_c = |\cot(A + \pi/4)|, \quad \tan \delta_c = \frac{2 \left| \tan \theta_p \right| \tan P}{\tan^2 \theta_p - \tan^2 P} \quad \text{when } C = -\pi/4; \quad (13)$$

となる.

ここで $T_c = t_s/t_f, \delta_c = \delta_s - \delta_f$ である.

この方法によれば, S の主入射角を折り返し光路型の構成によって正確に設定し, $\lambda/4$ 板をリターダーとして働かせ, 透過型エリプソメトリーによって, $\lambda/4$ 板の ρ_c を測定することができる.

測定手順

1. 試料台に Au の試料を取り付け,入射角をおおむね主入射角 (Au に対しては約 74° ,Pt に対しては約 80°) とする.
2. 可動反射鏡 M1 を光路に挿入し,ほぼ同じ光路に光を折り返す.
3. 偏光子の方位角と入射角を交互に変化させ,D2 において消光させ, θ_p を求める.この際,消光位置は $P > 0$ 及び $P < 0$ の領域に 2 つある. (それぞれ,左回り円偏光,右回り円偏光に対応)
4. 入射角 ϕ_p を固定したままで,M₁ を光路から外し $\lambda/4$ 板に透過させる.このとき $\lambda/4$ 板は $+\pi/4$ 又は $-\pi/4$ とし,偏光子及び検光子を回転して検出器 D1 において消光をとる.
5. 求められた θ_p, P, C, A をもとに (12)、(13) 式から T_c, δ_c を求める.

2-4 測定結果

1. 雲母をガラスで挟み AR コートを施したもの.(最も標準的な市販品)

表 1 Au リターダーを用いたガラスで挟んだλ/4 板透過型エリプソメトリー測定値

主入射角 ϕ_p	主方位角 θ_p	λ/4 板方位角 C	偏光子方位角 P	検光子方位角 A
73.663	41.640	+45.000	41.600	90.200
		-45.000	41.840	0.165
73.638	-41.600	+45.000	-41.760	0.110
		-45.000	-41.485	90.010

表 2 λ/4 板光学特性値

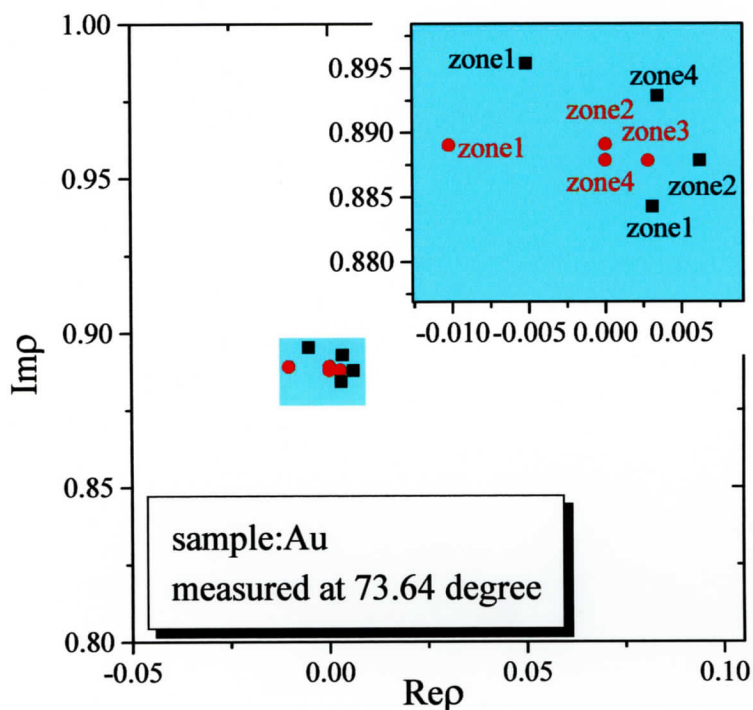
Zone	Tc	Ψ_c	δ_c	Re ρ_c	Im ρ_c
1	0.99426	43.835	-89.5974	0.00699	-0.99423
2	0.99304	44.800	-89.9194	0.00140	-0.99304
3	1.00035	45.010	-89.7683	0.00405	-1.00034
4	0.99617	44.890	-89.6778	0.00560	-0.99615

主入射角での補正の結果を以下に示す.

表 3 Au 試料のガラスで挟んだλ/4 板の補正前後でのφ,Δの値

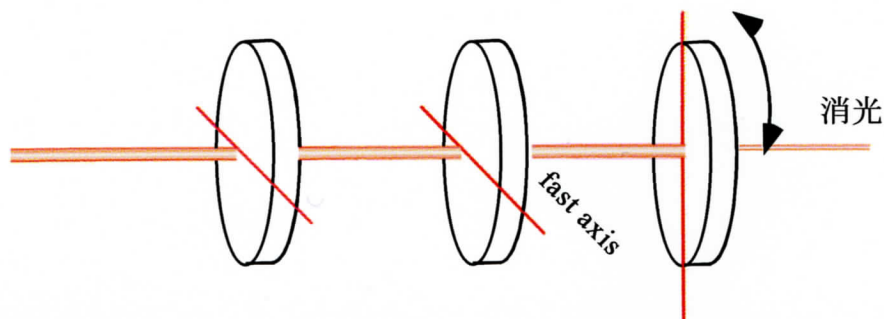
Zone	λ/4 板 方位角 C	偏光子 方位角 P	検光子 方位角 A	$\rho_c = -i$		ρ_c 補正後	
				φ	Δ	φ	Δ
1	-45.000	41.840	0.165	41.840	90.330	41.640	90.660
2	+45.000	41.600	90.200	41.600	89.600	41.640	90.000
3	-45.000	-41.485	90.010	41.485	89.800	41.600	89.820
4	+45.000	-41.760	0.110	41.760	89.780	41.600	90.000

図 3 Au 試料のガラスで挟んだ $\lambda/4$ 板の補正前後での ρ の値



このように、ガラスで挟んだ $\lambda/4$ 板では主入射角において、 ϕ, Δ の標準偏差はそれぞれ補正前では $0.16^\circ, 0.31^\circ$, 補正後では $0.02^\circ, 0.37^\circ$ となり、 Δ に関しては補正後の方が標準偏差が大きくなっている。これは $\lambda/4$ 板を挟んでいるガラスの残留ひずみの影響であると考えられる。

図 4 ガラスの残留ひずみによる消光位置のずれ



偏光子と検光子の間に $\lambda/4$ 板を配置し、偏光子を p 方向、検光子を s 方向と

した直交ニコルの状態で、進相軸を p 方向に向け最も消光する位置を $\lambda/4$ 板の p 方向とし、 $\lambda/4$ 板の方位角を固定したまま、検光子の方位角を $+0.110^\circ$ 回転させるとさらに強度が落ちるところがあった.このガラスのひずみによる検光子の方位角誤差は、測定上の要求に対して大きく、雲母を挟んだガラスの残留ひずみが無視できない.このような場合、 $\lambda/4$ 板は、挟んでいるガラスを位相子とみなして補正すべきであるが、補正式ではガラスのひずみを考慮していないので、雲母に張り合わされたガラスの光学特性値を実測し正確に補正することはできない.ガラスで挟んだ $\lambda/4$ 板を用いるときは、ガラスのアニールに十分注意し、ひずみの十分小さなもので挟む必要がある.

2 雲母のみのもの.

ガラスで挟んでない場合、偏光子を p 方向、検光子を消光にし、 $\lambda/4$ 板の fast 軸を p 方向に向けると最も暗くなる場所が存在した.

表 4 Au リターダーを用いた雲母のみ $\lambda/4$ 板透過型エリプソメトリー測定値

主入射角 ϕ_p	主方位角 θ_p	$\lambda/4$ 板方位角 C	偏光子方位角 P	検光子方位角 A
73.591	41.690	+45.000	39.270	90.510
		-45.000	44.190	0.530
	-41.630	+45.000	-44.235	-0.525
		-45.000	-39.250	89.595

表 5 $\lambda/4$ 板光学特性値

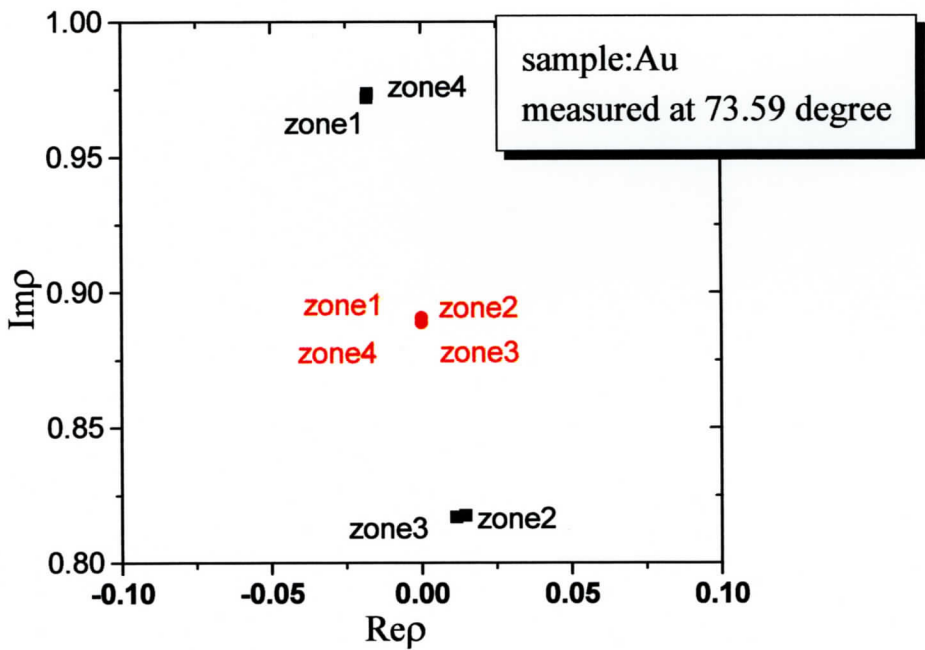
Zone	Tc	Ψ_c	δ_c	Re ρ_c	Im ρ_c
1	0.98167	44.470	-84.9918	0.08570	-0.97792
2	0.98235	44.490	-85.1036	0.08385	-0.97877
3	0.98596	44.595	-85.1824	0.08279	-0.98248
4	0.98184	44.475	-84.7818	0.08930	-0.97777

主入射角での補正の結果を以下に示す.

表 6 Au リターダーを用いた雲母のみの $\lambda/4$ 板の補正前後での ϕ, Δ の値

Zone	$\lambda/4$ 板 方位角 C	偏光子 方位角 P	検光子 方位角 A	$\rho c = -I$		Pc 補正後	
				ϕ	Δ	ϕ	Δ
1	-45.000	44.190	0.530	44.190	91.060	41.690	90.000
2	+45.000	39.270	90.510	39.270	88.980	41.690	90.000
3	-45.000	-39.250	89.595	39.250	89.190	41.630	90.000
4	+45.000	-44.235	-0.525	44.235	91.050	41.630	90.000

図 5 Au 試料の雲母のみの $\lambda/4$ 板補正前後での各ゾーンの ρ の値



測定の結果、 ϕ, Δ の標準偏差は、それぞれ補正前 2.86° , 1.14° であり、3 種の $\lambda/4$ 板の中で最も補正前のゾーン間誤差は大きかった.補正後 0.03° , 0.00° であり、補正は十分されている.しかし、消光の程度が AR コートを施したものに比べて悪く、消光位置近傍での消光の感度が鈍くなる.また、遅相軸の方が進相軸より吸収が大きくなっている.補正前のゾーン間誤差が大きいことと、遅相軸の方が進相軸より大きくなるのは、反射防止されていないため $\lambda/4$ 板内部で

の多重反射に起因する.⁽¹⁾

3. 雲母に直接 AR コートを施したもの.

2 と同様に、偏光子を p 方向、検光子を消光にし、 $\lambda/4$ 板の fast 軸を p 方向に向けると最も暗くなる場所が存在した.また消光の程度も 1 と同程度によい.

表 7 Pt リターダーを用いた雲母に AR コートを施した $\lambda/4$ 板透過型エリプソメトリ測定値

主入射角 ϕ_p	主方位角 θ_p	$\lambda/4$ 板方位角 C	偏光子方位角 P	検光子方位角 A
79.688	33.900	45.000	34.200	89.820
		-45.000	33.530	-0.025
	-33.800	45.000	-33.500	0.030
		-45.000	-34.110	90.125

表 8 $\lambda/4$ 板光学特性値

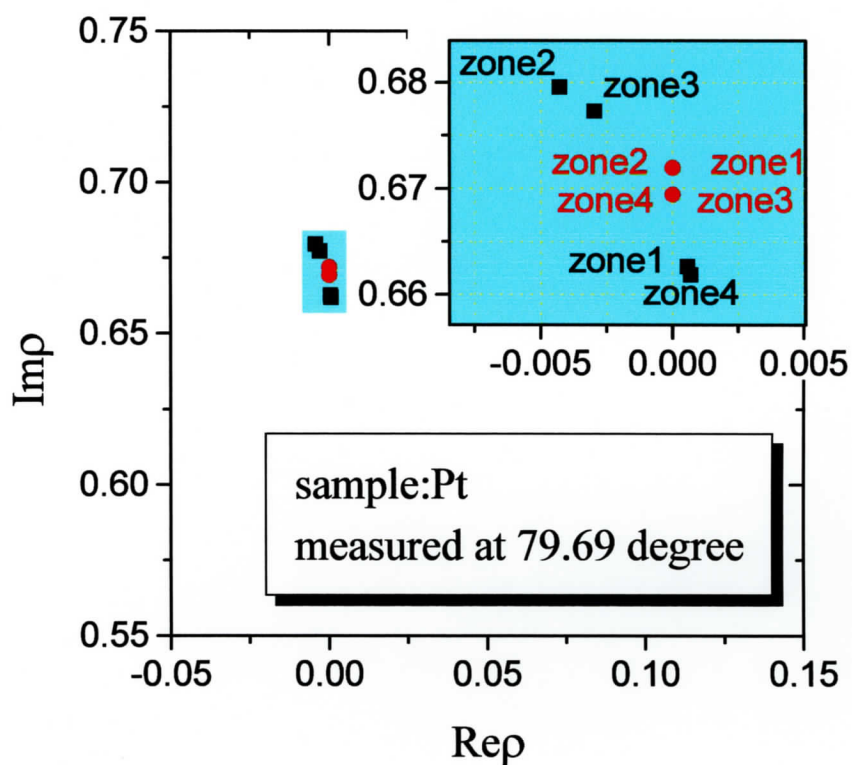
Zone	Tc	Ψ_c	δ_c	Re ρ_c	Im ρ_c
1	1.00087	45.025	-90.8014	-0.01400	-1.00078
2	1.00630	45.180	-90.6467	-0.01136	-1.00624
3	1.00437	45.125	-90.0009	-0.01173	-1.00430
4	1.00105	45.030	-90.6504	-0.01136	-1.00098

主入射角での補正の結果を以下に示す.

表 9 Pt リターダーを用いた雲母のみの $\lambda/4$ 板の補正前後での ϕ, Δ の値

Zone	$\lambda/4$ 板 方位角 C	偏光子 方位角 P	検光子 方位角 A	$\rho_c = -i$		ρ_c 補正後	
				ϕ	Δ	ϕ	Δ
1	-45.000	33.530	-0.025	33.530	89.950	33.900	90.000
2	45.000	34.200	89.820	34.200	90.340	33.900	90.000
3	-45.000	-34.110	90.125	34.100	90.250	33.800	90.000
4	45.000	-33.500	0.030	33.500	89.940	33.800	90.000

図 6 Pt 試料の雲母に AR コートを施した $\lambda/4$ 板補正前後での各ゾーンの ρ の値



測定の結果、 ϕ, Δ の標準偏差は、それぞれ補正前 0.37° , 0.21° であり、補正前のばらつきも雲母のみのものに比べて少ない。補正後は 0.06° , 0.00° であり、補正は十分されている。消光の程度もガラスで挟んだものと同程度である。

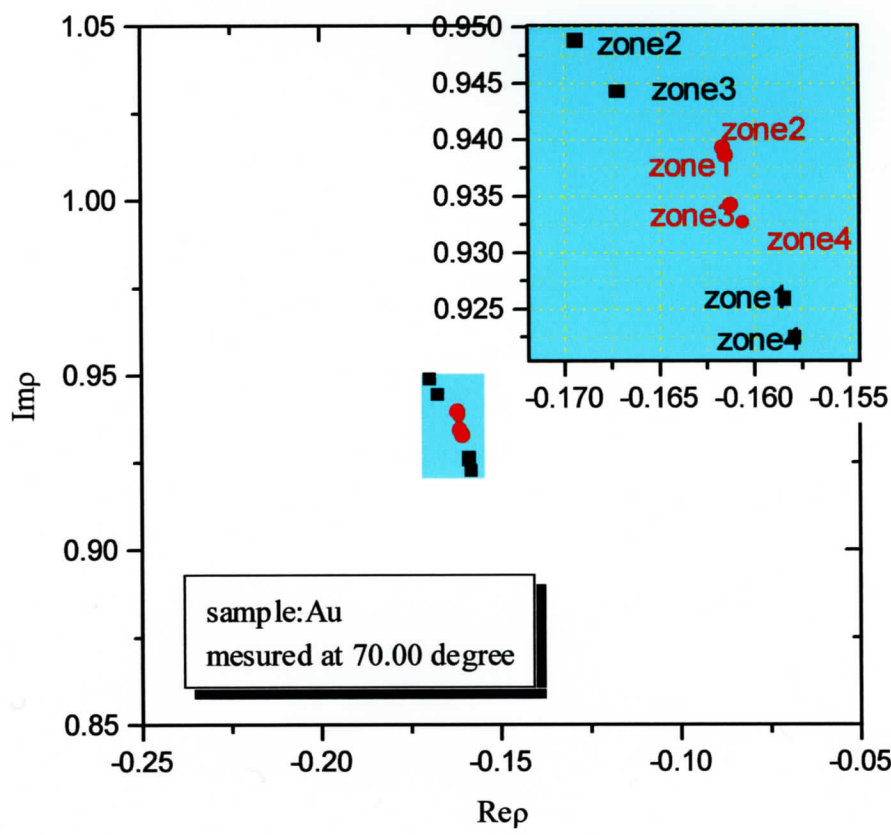
以上の結果より、 $\lambda/4$ 板は雲母に直接 AR コートを施したものを使用し、以下の試料について補正を行い、 ϕ, Δ のおおよその補正量を見積もった。

入射角 70.00° 試料: Au

表 10 Au 試料, 入射角 70° における $\lambda/4$ 板の補正前後での ϕ, Δ の値

Zone	$\lambda/4$ 板 方位角 C	偏光子 方位角 P	検光子 方位角 A	$\rho c = -i$		ρc 補正後	
				ϕ	Δ	ϕ	Δ
1	-45.000	43.205	4.855	43.205	99.710	43.599	99.760
2	+45.000	43.940	84.940	43.940	100.120	43.622	99.766
3	-45.000	-43.795	95.020	43.795	100.040	43.466	99.795
4	+45.000	-43.100	-4.855	43.100	99.710	43.420	99.770

図 7 Au 試料, 入射角 70° での ρ の補正

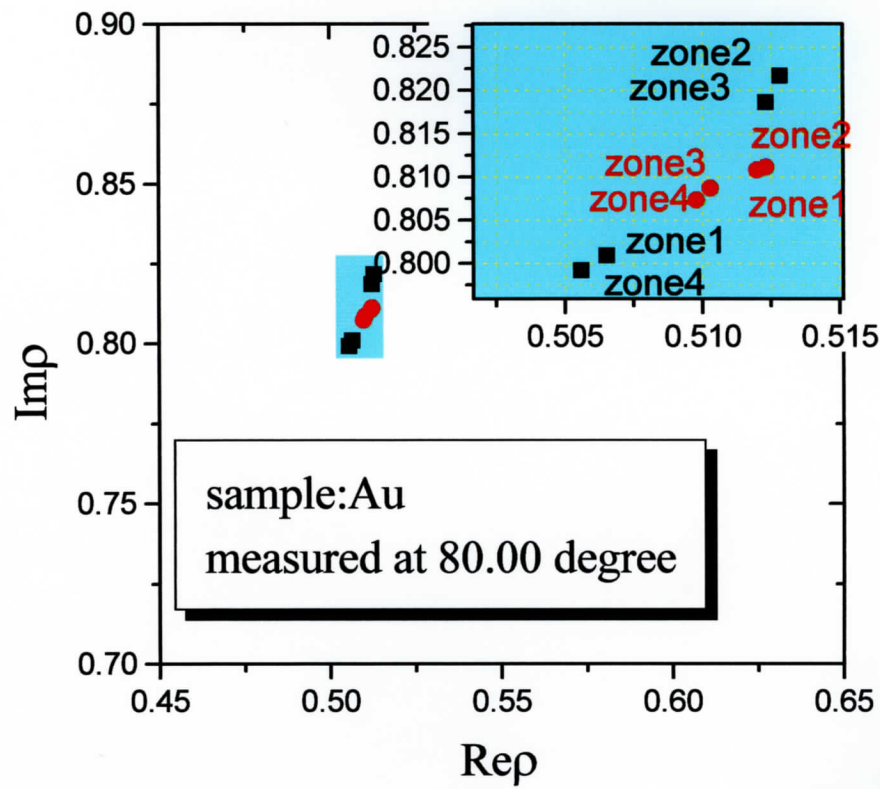


入射角 80° 試料: Au

表 11 Au 試料, 入射角 80° における $\lambda/4$ 板の補正前後での ϕ, Δ の値

Zone	$\lambda/4$ 板 方位角 C	偏光子 方位角 P	検光子 方位角 A	$\rho c = -i$		ρc 補正後	
				ϕ	Δ	ϕ	Δ
1	-45.000	43.460	-16.155	43.460	57.690	43.798	57.730
2	+45.000	44.085	-74.015	44.085	58.030	43.812	57.723
3	-45.000	-44.000	73.980	44.000	57.960	43.717	57.747
4	+45.000	-43.400	16.160	43.400	57.680	43.675	57.729

図 8 Au 試料, 入射角 80° での ρ の補正

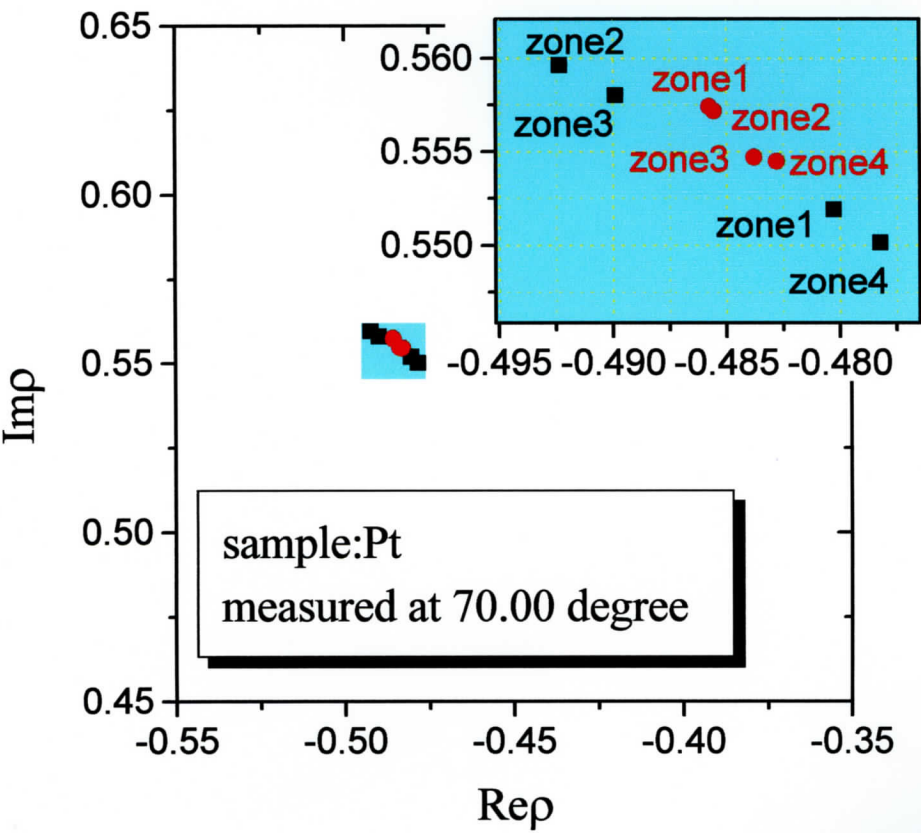


入射角 70° 試料:Pt

表 12 Pt 試料,入射角 70° におけるλ/4 板の補正前後でのφ,Δの値

Zone	λ/4 板 方位角 C	偏光子 方位角 P	検光子 方位角 A	ρ c = -i		ρ c 補正後	
				φ	Δ	φ	Δ
1	-45.000	36.190	20.515	36.190	131.030	36.478	131.071
2	+45.000	36.700	69.330	36.700	131.340	36.467	131.071
3	-45.000	-36.595	-69.360	36.595	131.280	36.354	131.094
4	+45.000	-36.090	-20.500	36.090	131.000	36.324	131.047

図 9 Pt 試料,入射角 70° での ρ の補正

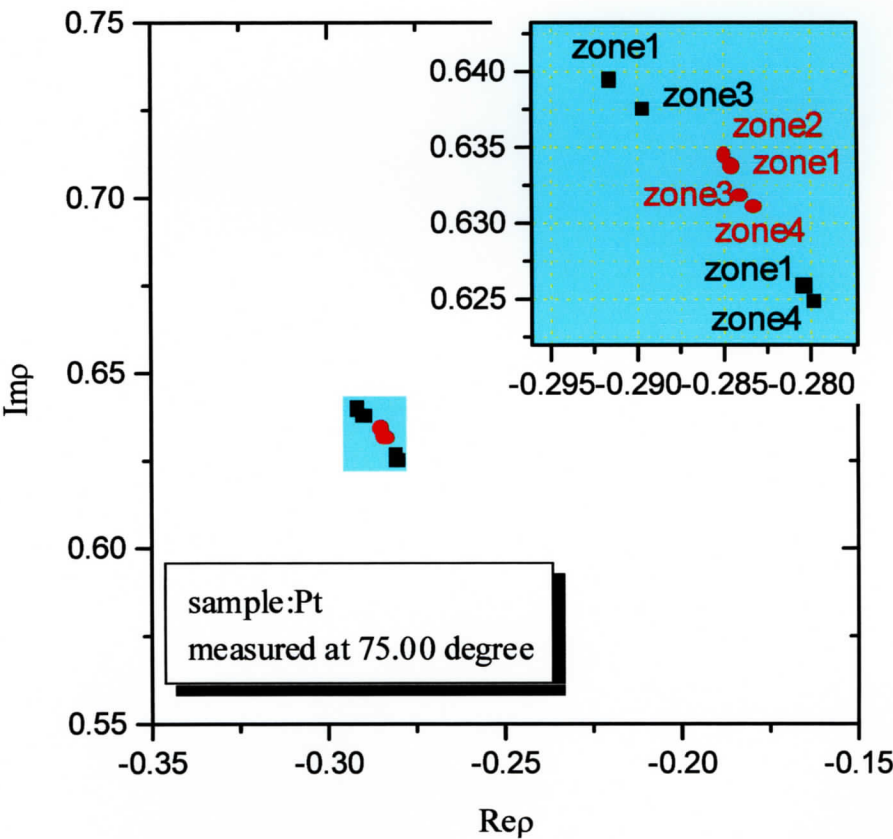


入射角 75° 試料:Pt

表 13 Pt 試料,入射角 75° におけるλ/4 板の補正前後でのφ,Δの値

Zone	λ/4 板 方位角 C	偏光子 方位角 P	検光子 方位角 A	ρ c = -i		ρ c 補正後	
				φ	Δ	φ	Δ
1	-45.000	34.440	12.065	34.440	114.130	34.782	114.178
2	+45.000	35.095	77.745	35.095	114.510	34.818	114.183
3	-45.000	-34.995	-77.785	34.995	114.430	34.709	114.204
4	+45.000	-34.395	-12.060	34.395	114.120	34.672	114.176

図 4. 10 試料 Pt,入射角 75° での ρ の補正

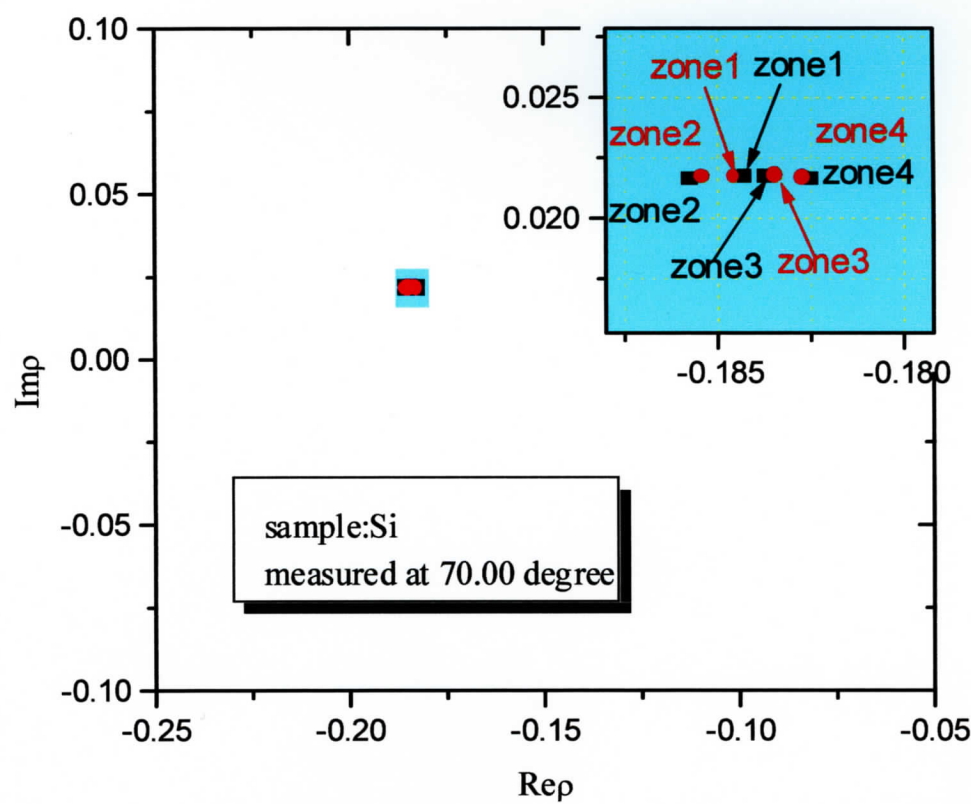


入射角 70° 試料:Si

表 14 Si 試料,入射角 70° におけるλ/4 板の補正前後でのφ,Δの値

Zone	λ/4 板 方位角 C	偏光子 方位角 P	検光子 方位角 A	ρ c = -i		ρ c 補正後	
				φ	Δ	φ	Δ
1	-45.000	10.510	41.645	10.510	173.290	10.527	173.297
2	+45.000	10.590	48.315	10.590	173.370	10.576	173.329
3	-45.000	-10.480	-48.370	10.480	173.260	10.466	173.231
4	+45.000	-10.410	-41.625	10.410	173.250	10.424	173.257

図 11 試料 Si,入射角 70° での ρ の補正



$\lambda/4$ 板補正前と補正後の ϕ , Δ のそれぞれの標準偏差を以下の表に示す.

表 15 $\lambda/4$ 板の補正前後での ϕ, Δ の標準偏差

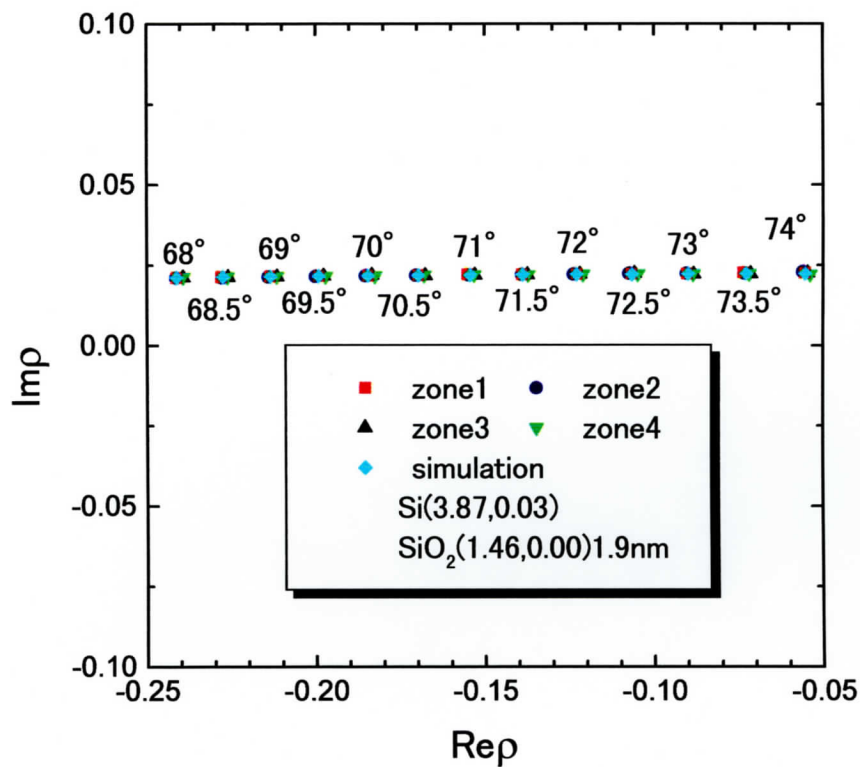
試料	入射角 (degree)	ρc 補正前		ρc 補正後	
		ϕ 標準偏差 (degree)	Δ 標準偏差 (degree)	ϕ 標準偏差 (degree)	Δ 標準偏差 (degree)
Au	70.00	0.42	0.22	0.10	0.02
Au	80.00	0.36	0.18	0.07	0.01
Pt	70.00	0.30	0.17	0.08	0.02
Pt	75.00	0.37	0.20	0.07	0.01
Si	70.00	0.07	0.05	0.07	0.04

測定されたすべての試料において、 ϕ, Δ の標準偏差は補正後の方が補正前に比べて減少しており、さらに、ゾーン 1 とゾーン 3 はゾーン 2, ゾーン 4 に比べ、4 ゾーン平均の値に常に近くなっている.実際の多層膜成膜のその場観察では、ゾーン 3 を用いる.その場合の 4 ゾーン平均の ϕ , Δ からのゾーン 3 からの ϕ , Δ ずれは、それぞれ最大で 0.06° , 0.05° となる.これらの値は補正前に比べてそれぞれ約 1/5 倍程度に改善されている.

以上の補正の方式を用いて Si ウエハを標準試料として,主方位角近傍での各ゾーンにおける入射角依存性を測定した. この測定は、方位角の変化する直線偏光を検出する場合に相当する.

これよりそれぞれの zone において $\text{Re } \rho$ の標準偏差は 0.0014 以内 $\text{Im } \rho$ の標

図 12 Si ウエハの ρ の入射角依存性



準偏差は 0.0003 以内であり,回転検光子法による単一ゾーン測定でも高い精度を得ることができた.

参考文献

(1) Paul.H.Smith , Surf.Sci., Vol.16 , (1969) , 33

Reprinted from

Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36 (1997) pp. 7720-7725
Part 1, No. 12B, December 1997

New Ellipsometric Approach to Critical Dimension Metrology
Utilizing Form Birefringence Inherent in a Submicron Line-and-Space Pattern

Seiji TAKEUCHI, Minoru YOSHII and Masaki YAMAMOTO¹
Nanotechnology Research Center, Canon Inc., 20-2 Kiyohara-Kogyo-Danchi, Utsunomiya, Tochigi 321-32, Japan
¹Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-11, Japan

KEYWORDS: ellipsometry, metrology, birefringence, latent images, subwavelength gratings

be used for simple linewidth monitoring, he did not explain the analytical ellipsometry accounting for the high sensitivity. Ellipsometry, in general, has a large non-linearity in sensitivity depending on the measurement conditions such as the incident angle and the wave-length. Therefore, simulated calculations to determine the best measurement conditions will be necessary. Sub-wavelength periodic structures have long been known to have form birefringence.^{6,7} Recently, the structures have been closely studied to determine their applicability in various polarization elements, such as polarizers,^{8,9} retarders,¹⁰ and antireflectors.¹¹ Many of these designs involve the rigorous calculation of the propagating waves and the behavior of the subwavelength gratings and their interactions with light have become predictable. We have successfully implemented the form birefringence of the subwavelength structures to the ellipsometric measurement of resist patterns and calculated the changes of ellipsometric parameters caused by linewidth variations. In this paper, we will report on the calculations of each ellipsometric parameter. In the experiment, we use a conventional null ellipsometer with the He-Ne laser wavelength 0.633 μm to measure the ellipsometric parameters of 0.35 μm line-and-space (L&S) resist patterns. The results of the experiment and the calculations will be compared. In the analysis, we use the least squares method to relate the ellipsometric parameters to the linewidth of resist patterns, and the results are compared with the linewidth measurement by CD-SEM. We also perform the same measurement and analysis on latent images of undeveloped resist patterns.

2. Form Birefringence of Resist Patterns

When the L&S resist patterns have a period much smaller than the wavelength of light, they can be considered as subwavelength gratings, and they show form birefringence when irradiated by light. Figure 1 is a schematic of a L&S resist pattern. The grating vector K is defined perpendicular to the grating

1. Introduction
In the production process of integrated circuits (IC), a precise and rapid method for Critical Dimension (CD) metrology is of great concern for increasing the production yield. Many methods of CD metrology have been proposed, with a view to develop a nondestructive and rapid method of measurement. CD scanning electron microscopy (SEM) have evolved to measure linewidths at a high throughput without the destruction of the samples in order to be used in the production line. However, they are reaching their limit in terms of resolution for the scanning generations of IC, such as 1 Gbit dynamic random access memory (DRAM).¹ Scatterometry has been investigated for CD metrology, in which the precise linewidths are determined according to the intensity distribution of the diffracted laser light by comparison to previously measured or calculated distributions.² Latent images of undeveloped resist patterns with diffraction intensities have also been measured to shorten the time required for monitoring by removing the post-exposure process.³ However, as the linewidths for the leading edge lithography process narrow, diffraction no longer occurs and the reflected ray will be the only tool for the pattern probing measurement. Linewidth variation measured by ultraviolet optical reflectometry has been recently reported.⁴ Although qualitative agreement between results of experiments and simulations have not been achieved, the absolute linewidth measurement has not been accomplished. Another possibility of rapid and precise linewidth measurement is by ellipsometry, as reported by Arimoto.⁵ Arimoto has measured developed resist patterns of electron beam (EB) resists and polysilicon patterns. He has shown the existence of large variations in the ellipsometric parameters, which corresponds to a high sensitivity of ellipsometry for such measurement. Correlation is attained between the ellipsometric measurements and the linewidths by measuring the same samples with a SEM. Although this correlation may

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録しておりません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。